

# 爆炸冲击波强度对 16MnR 钢焊缝 疲劳性能的影响 \*

陈亮山 赵铁民 斯重遥 陈怀宁

(沈阳 中国科学院金属研究所)

**摘 要** 本研究采用旋转弯曲焊接接头疲劳试样,通过改变炸药与取样部位之间距离的办法,使试样工作段受到不同强度的冲击波作用,进行疲劳试验。结果表明,16MnR 钢焊缝经爆炸处理后,冲击波的塑性作用区、弹性作用区以及弹-塑性转变区的疲劳性能均得到改善,但三区有不同的疲劳特性。

**关键词** 爆炸处理;冲击波;焊缝;疲劳强度

## 0 序 言

为消除焊接残余应力,提高构件的使用性能,爆炸消除焊接残余应力取代昂贵的退火处理,在国内外都得到了不同程度的应用<sup>[1,2]</sup>。试验表明,爆炸处理不但可以消除焊接残余应力,而且材料经爆炸处理后,组织结构发生变化,其疲劳性能的改善更为突出。主要表现在:爆炸处理后的材料具有较高的疲劳强度,较高的疲劳裂纹扩展门槛值和较低的疲劳裂纹扩展速率<sup>[3,4]</sup>。文献[4]还发现,不仅在冲击波的塑性作用区,而且在冲击波的弹性作用区材料的疲劳性能均有明显提高。但迄今为止,对爆炸引起材料自身改性机制,研究尚十分不够,太多的分析还是推测性的,而对何种冲击波强度下材料自身改性最好,也未见报道。因此,进一步研究不同冲击波强度下材料的疲劳性能,对弄清爆炸冲击改善材料疲劳性能的机制,以及在工业上的进一步推广运用,都具有深远的意义。

## 1 试验方法

### 1.1 焊接试板

试验采用工程结构中常用的 16MnR 钢热轧板,焊接试板尺寸为 445mm×200mm×30mm,

\* 本课题为国家自然科学基金项目

开 60° X型坡口,用手工电弧焊接,焊条为 J507,上下两面交替焊接,共焊七层。16MnR 钢的化学成分,母材的机械性能见表 1和表 2。

表 1 16MnR 钢板的化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical composition of steel 16MnR(wt%)

C	Mn	Si	P	S
0.17	1.43	0.42	0.033	0.016

表 2 16MnR 母材和焊缝的机械性能

Table 2 Mechanical properties of steel 16MnR and weld metal

Specification	$\sigma_s$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$\delta_5$ (%)
Base metal	344	512	25.3
Weld metal	480	600	24.4

1.2 爆炸处理工艺

爆炸处理采用悬定掠过爆轰形式,单根药条宽 10mm,厚 5mm,爆速为 5.000m/s,密度  $1.1 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ,药条间距 15mm,药垫厚 5mm,见图 1。

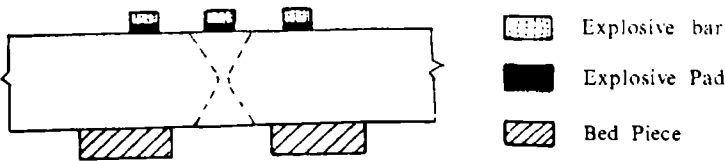


图 1 焊接试板爆炸处理示意图

Fig.1 Sketch of explosion treatment for welded plate

1.3 旋转弯曲疲劳试样的取样方法及不同冲击波强度的获得

试验中所用疲劳试样均取自紧贴焊板表面一侧,以使全部疲劳试样具有相同的焊接状态。

采用相同的爆炸条件,通过改变炸药与取样部位之间距离的办法,使疲劳试样获得不同强度的冲击波作用,见图 2,其中所开弧形槽半径为 75mm,入射波的传播方向自上而下。疲劳试样上表面与炸药的距离为  $x$ ,在相同的爆炸条件下, $x$  可视为冲击波强度的表征。不同试样的  $x$  值列于表 3。10<sup>#</sup> 为未爆炸处理试样。在研究冲击波强度对金属疲劳性能影响时,本文忽略了反射拉伸波的影响。

表 3 疲劳试样的取样位置

Table 3 location of fatigue specimens in welded plate

No.	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>	10 <sup>#</sup>
$x$ (mm)	0	3	6	12	14	16	18	21	

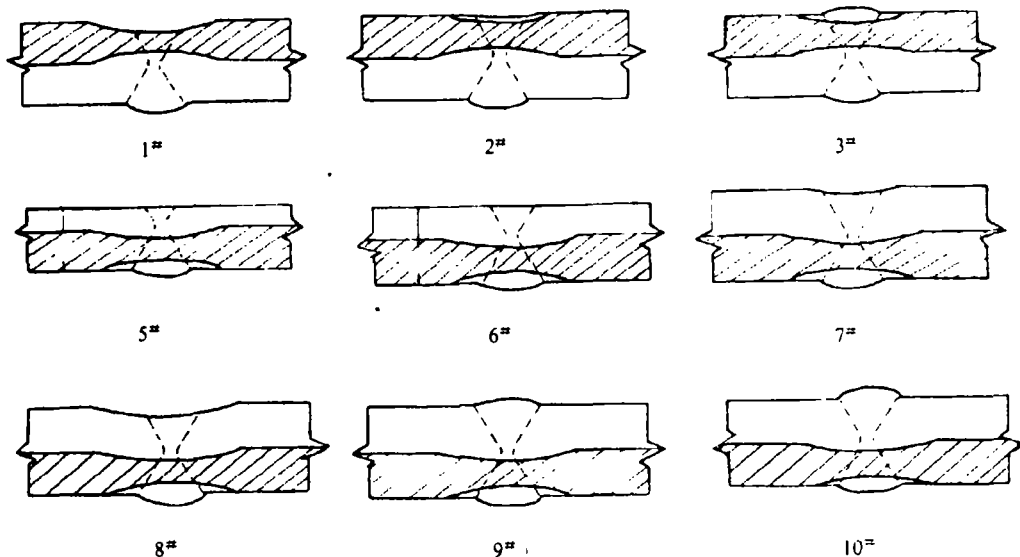


图2 疲劳试样取样位置示意图

Fig.2 Sketch of location of fatigue specimens in welded plate

#### 1.4 疲劳试验及数据处理方法

旋转弯曲疲劳试样符合GB2107-80, 工作段直径为 7.50mm, 取在焊缝上。试样形状及尺寸见图 3。旋转弯曲疲劳试验在 PWC-510WG 高温高速旋转弯曲疲劳试验机上进行, 按常规疲劳试验方法测定材料的 S-N 曲线, 循环基数  $N_c$  定为  $10^7$ , 试验频率为 83Hz (5,000rpm), 所有疲劳试验均在室温空气介质中进行。

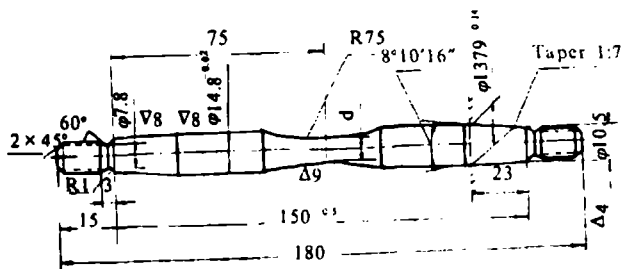


图3 旋转弯曲疲劳试样

Fig.3 Sketch of rotational bending fatigue specimen

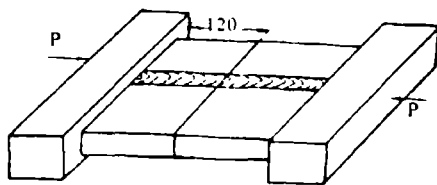


图4 测定爆炸冲击波作用的塑性区范围示意图

Fig.4 Sketch of determining plastic zone affected by explosion shock wave

#### 1.5 冲击波作用塑性区的测定方法

取200mm长焊板, 一面见平后将焊板中间锯开, 相对面磨平并电解抛光, 涂上黄油

后用夹具压实,见图4。经1.2节爆炸工艺处理后,在抛光面可见药条下材料某一区域折射率发生显著变化,此区域即为冲击波作用的塑性区,测量此区域的深度为12mm左右。

## 2 试验结果和讨论

### 2.1 冲击波引起的塑性形变区的计算

根据文献[6、7],在本文的爆炸处理条件下,求得16MnR钢中弹性波波速  $C_1 = 6.200$  m/s, 塑性波波速  $C_p = 5.060$  m/s, 炸药/金属分界面处最大压力  $P_m = 9$  GPa, 冲击波入射倾角  $\theta = 51.1^\circ$ 。

一个冲击脉冲通过金属的实际过程应为图5所示<sup>[8]</sup>。在  $t_1$  区段,冲击波有确定的峰值压力、脉冲持续时间和释放率。波的卸载部分的速度为  $U_p + C$ ,  $U_p$  是质点速度,  $C$  为该压下的声速。随着波的扩展,由于  $U_p + C > U_s$  ( $U_s$  为冲击波波前传播速度),结果卸载波逐渐赶上入射波波前,从而使脉冲间隔逐渐减小为零。在脉冲间隔等于零之后,峰值压力开始降低,随着峰值压力的降低,冲击波波前的速度也随之减小:  $U_{s4} < U_{s3} < U_{s2} = U_{s1}$ 。当波前强度在一维应变情况下达到  $2\sigma_s$  时,弹性卸载波与弹性入射波的速度相同,在没有波的衰减和弥散的情况下,将会变成稳定的锯齿波在金属中传播。

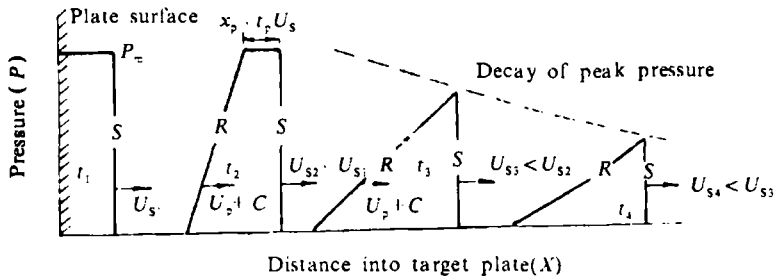


图5 一个冲击脉冲通过金属的过程;卸载波波前逐渐超越冲击波波前<sup>[8]</sup>。

Fig.5 Progress of a shock pulse through material; rarefaction front steadily overtakes shock front<sup>[8]</sup>.

现在来求脉冲间隔等于零时塑性波走过的距离  $\delta$ , 并以此作为冲击波塑性作用区范围。设脉冲时间为  $t_p$ , 塑性波在相应时间里传播的距离为  $x_p$ , 有:

$$x_p = t_p U_s \quad (1)$$

$$U_s = \frac{s}{t} \quad (2)$$

$$U_p + C = \frac{s + x_p}{t} \quad (3)$$

三式结合,可以导出:

$$S = \frac{U_s^2 t_p}{U_p + C - U_s} \quad (4)$$

由文献[5, 8]知,在本文采用的爆炸工艺下,  $t_p = 0.75\mu s$ ,  $U_i = 4025m/s$ ,  $U_p = 237m/s$ ,  $C = 4227m/s$ , 代入(4)求得  $S = 27.7mm$ , 从而求得冲击波塑性作用区范围  $S_p = S \cos \theta = 17.4mm$  以上(若以  $U_i = C_p$ ,  $U_p + C = C_i$  代入, 得出冲击波的塑性作用区亦在  $10.5mm$  以上)。2.5 节中冲击波塑性作用区是根据冲击波下材料发生的强烈塑性流动引起折射率的显著变化进行测定的。在远离炸药的塑性作用区, 材料的塑性流动不明显, 肉眼很难观察到折射率的变化, 使测得的塑性作用区范围偏低。此外, 冲击波塑性作用区范围还可以通过微观组织结构(孪晶、位错密度和形态)、显微硬度等方法进行测定。从下节的讨论中还将看到在本文采取的爆轰工艺和条件下, 冲击波的塑性作用区范围还会在疲劳性能曲线中得到很好的反应。

## 2.2 疲劳试验结果

不同冲击波强度处理状态下的旋转弯曲疲劳试验结果见图 6。

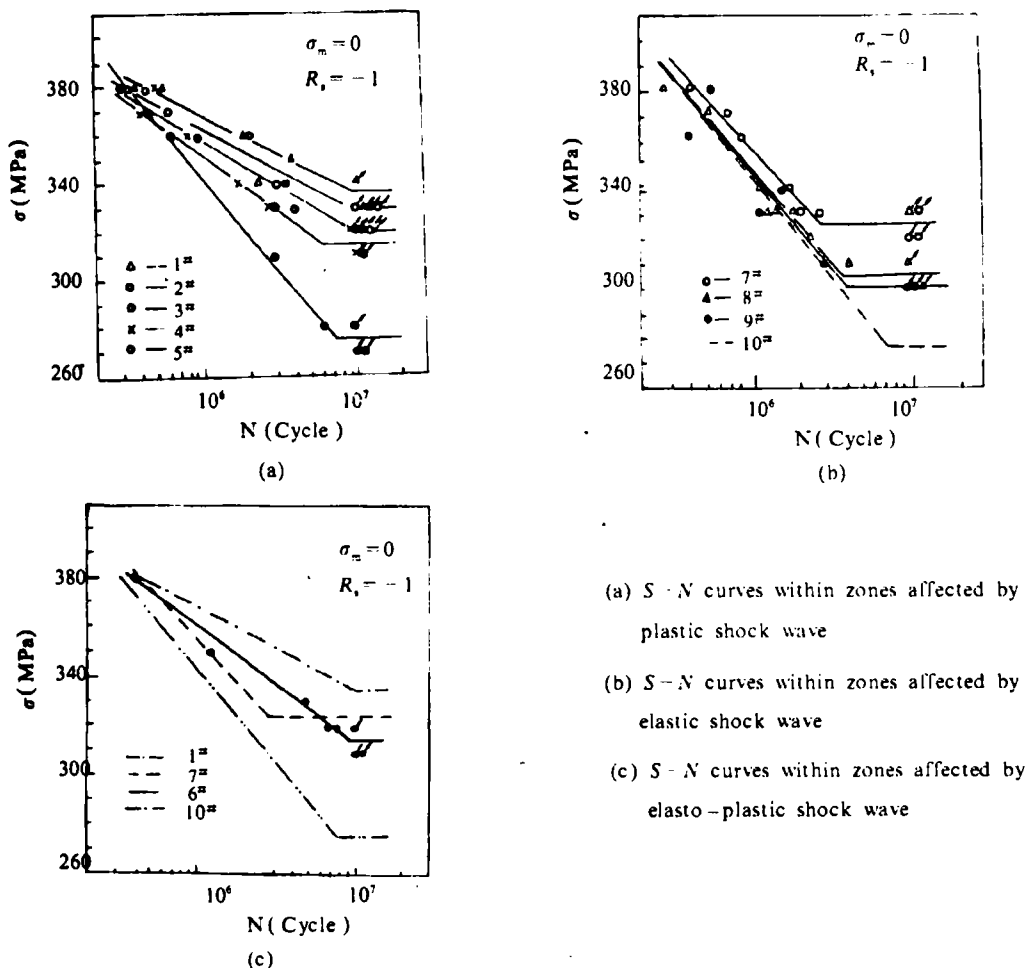


图 6 16MnR 钢焊缝旋转弯曲疲劳  $S-N$  曲线

Fig.6 Rotational bending fatigue  $S-N$  curves of 16MnR steel weld

从图6中可以看出:塑性作用区内焊缝的疲劳极限与爆炸处理前相比均有提高。在疲劳极限值以上,随着疲劳交变应力幅值的提高,焊缝的疲劳强度或寿命的提高幅度减小;当应力幅值在360MPa左右时,焊缝的疲劳强度或寿命无多大改变。弹性作用区内焊缝的疲劳强度与爆炸处理前相比,焊缝的疲劳极限值有一定的提高,在极限值以上与爆炸处理前基本相同;但在冲击波的强烈扰动区(7<sup>#</sup>),焊缝的疲劳强度在极限值及极限值以上均有提高,且在极限值以上,随着应力幅值的提高,疲劳强度或寿命提高幅度的减小不明显。无论在冲击波的塑性作用区,还是弹性作用区,随着冲击波作用强度的减弱焊缝疲劳性能的改善程度也相应降低。6<sup>#</sup>试样焊缝的疲劳强度在极限值以上的走向介于弹性与塑性作用区的走向之间,说明试样在工作段分别落在了弹性和塑性作用区内。根据表3,冲击波塑性作用区的范围在15mm左右,不仅精确了测定值,与计算值也基本相符。

以 $X$ 为横坐标,疲劳极限 $\sigma_{-1}$ 为纵坐标,得图7。由图可知,在冲击波的塑性作用区,随着冲击波强度的减弱,焊缝的疲劳极限降低;弹性作用区也是如此。但在弹性、塑性转变区,出现一峰值。

爆炸冲击改善材料的疲劳性能,是一门新的领域。爆炸冲击引起材料疲劳性能的改变与爆炸冲击引起的材料位错结构和形态的变化密切相关。在另外一篇文章中,将对这一问题作详细的讨论。

### 3 结 论

(1)本文采用的掠过爆轰形式(爆速5000 m/s, 密度 $1.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 药条厚度5mm, 防烧蚀垫厚度5mm)对16MnR钢多道焊缝(X型坡口、上下两面交替焊接,共焊七层)进行爆炸处理情况下,炸药下方冲击波的塑性作用区深度约为15mm。

(2)16MnR钢焊缝经爆炸处理后,疲劳极限值在最强塑性作用区最高,随着冲击波作用强度的减弱而逐渐降低;在弹-塑性转变区焊缝疲劳极限出现新的峰值;最后在弹性作用区随着冲击波作用强度的减弱疲劳极限值以较快的速度逐渐降低。

(3)16MnR钢焊缝经爆炸处理后,在交变应力作用下弹性形变区的疲劳寿命的提高幅度基本不受应力幅值的影响;塑性形变区的疲劳寿命相对焊接状态有不同程度的提高,但应力幅值愈大,疲劳寿命的提高幅度相对愈少。

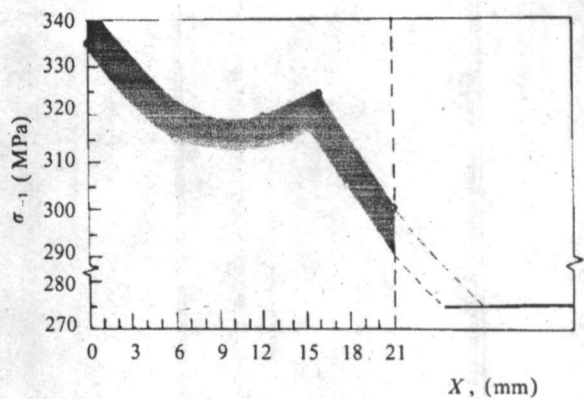


图7 不同冲击波强度下的16MnR钢焊缝的疲劳极限

Fig.7 Fatigue limits of 16MnR steel weld under different strength of shock wave

## 参 考 文 献

- 1 陈亮山 等, 爆炸消除焊接残余应力新技术专辑, 锅炉压力容器安全, 1989.
- 2 B. II. BeatoBNII, II Meeting on Explosive working of materials. USSR Novosibirsk, 1981, (9)
- 3 高桦 等, 爆炸处理提高 16MnR 钢疲劳性能, 固体力学学报, 1987, (2): 164
- 4 陈怀宁, 中国科学院金属研究所硕士论文, 1990.
- 5 高桦 等, 爆炸处理时裂纹动态扩展行为的研究, 力学学报, 1988, (6):496
- 6 爆炸及其作用(下册), 国防工业出版社, 1979.
- 7 宋秀娟, 洁谦编译, 金属爆炸加工的理论和应用, 中国建筑工业出版社, 1983.
- 8 Meyers M A, Murr L E. Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals. Concept and applications. Plenum, New York, 1981.

**Effect of explosion shock wave strength on fatigue property of  
steel 16MnR weld**

*Chen Liangshan, Zhao Tiemin, Si Zhongyao and Chen Huaining*

*(Institute of Metal Research, Academia, Sinica)*

**Abstract** In this research, rotational bending welded joint fatigue specimen was used. The welded joints of the specimen in the same state of the initial microstructure and residual stress were subjected to different strength of the shock wave by changing the distance between the explosive and the specimen. The results indicated that after the explosion treatment, the fatigue property of the plastic, elastic and elasto-plastic zones on the 16MnR steel weld, affected by the explosion shock wave, are all improved but the three zones have different characteristics.

**Key words** explosion treatment; shock wave; weld; fatigue strength